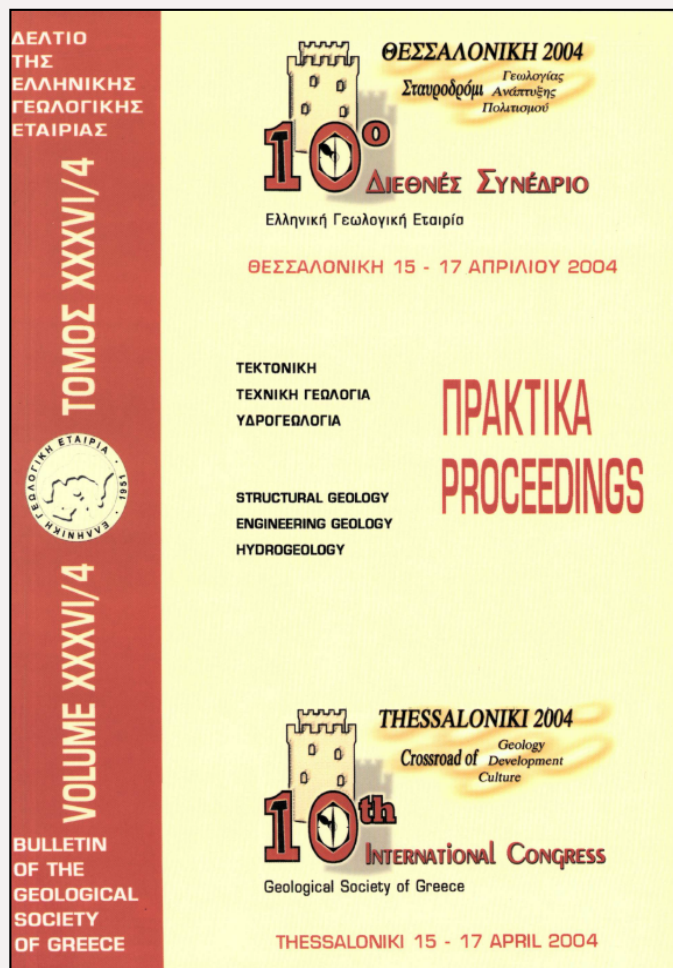


Bulletin of the Geological Society of Greece

Vol. 36, 2004



APPLICATION OF THE MATHEMATICAL MODEL MODFLOW ON A KARSTIC AQUIFER: THE CASE OF VIOTIKOS KIFISOS BASIN

Παναγόπουλος Α.

National Agricultural
Research Foundation,
Institute for Management of
Water Resources and the
Environment

Δρακοπούλου Ε.

Περλέρους Β.

<https://doi.org/10.12681/bgsg.16701>

Copyright © 2018 A. Panagopoulos, E.
Drakopoulou, V. Perleros



To cite this article:

Παναγόπουλος, Α., Δρακοπούλου, Ε., & Περλέρους, Β. (2004). APPLICATION OF THE MATHEMATICAL MODEL MODFLOW ON A KARSTIC AQUIFER: THE CASE OF VIOTIKOS KIFISOS BASIN. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 36(4), 2021-2030. doi:<https://doi.org/10.12681/bgsg.16701>

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ MODFLOW ΣΕ ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΟΥ ΒΟΙΩΤΙΚΟΥ ΚΗΦΙΣΟΥ

Παναγόπουλος Α.¹, Δρακοπούλου Ε.² και Περλέρος Β.³

¹ Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας, Ινστιτούτο Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, 57400 Σίνδος, Θεσσαλονίκη, panagoroulos.ln@nagref.gr

² Γεωλόγος, Αισχύλου 4, 19009, Ντράφι-Πικέρμι

³ Γεωλόγος, Διονύσου 56, 152 34, Χαλάνδρι, perleros@internet.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το MODFLOW αποτελεί έναν από τους πλέον τεκμηριωμένους κώδικες μαθηματικής προσομοίωσης της ροής σε κορεσμένη ζώνη πορώδους μέσου. Η προσομοίωση υδροφόρων συστημάτων μέσου ασυνεχειών (δηλαδή μέσου που χαρακτηρίζεται από την επικράτηση του δευτερογενούς και τριτογενούς πορώδους έναντι του πρωτογενούς), όπως για παράδειγμα ενός καρστικού υδροφορέα, με χρήση εξειδικευμένων μοντέλων είναι προβληματική. Εξαιτίας των υφιστάμενων δυσκολιών και αδυναμιών, επιχειρήθηκε η χρήση του συμβατικού μοντέλου MODFLOW για την προσομοίωση του καρστικού υδροφόρου συστήματος που αναπτύσσεται στη λεκάνη του ποταμού Βοιωτικού Κηφισού. Στόχος της άσκησης αυτής είναι να διερευνηθούν οι δυνατότητες, οι περιορισμοί, οι ιδιαιτερότητες και οι προϋποθέσεις εφαρμογής ενός τέτοιου κώδικα προσομοίωσης σε καρστικό περιβάλλον, ιδιαίτερα με τη χρήση σχετικά περιορισμένου όγκου πρωτογενών δεδομένων. Από τη σύνθεση και ρύθμιση του μοντέλου προκύπτει ότι η εφαρμογή του MODFLOW είναι σε γενικές γραμμές δυνατή και οδηγεί σε χρήσιμα αποτελέσματα. Όπως σε κάθε μαθηματικό ομοίωμα, απαιτείται η γνώση των παραδοχών και περιορισμών που αυτό εμπεριέχει, καθώς επίσης και η σε βάθος αξιολόγηση των δυνατοτήτων του. Το μαθηματικό μοντέλο του Βοιωτικού Κηφισού, αποτελεί ένα σημαντικό βοήθημα στη διαχείριση των υδατικών του πόρων και στη μελέτη της εξέλιξης της υδροφορίας της περιοχής.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα μαθηματικά ομοιώματα αποτελούν ένα δυναμικό, αξιόπιστο και διεθνώς αναγνωρισμένο εργαλείο που παρέχει σημαντική βοήθεια στην υδρογεωλογική μελέτη και κύρια στη διαχείριση των υδατικών πόρων μιας περιοχής (Wang & Anderson, 1982). Για την προσομοίωση της υπόγειας ροής σε κορεσμένη ζώνη πορώδους μέσου η βιβλιογραφία έχει να επιδείξει σειρά εναλλακτικών λύσεων και λογισμικών πακέτων. Οι περισσότεροι από τους εξειδικευμένους κώδικες που προτείνονται κατά διαστήματα για την προσομοίωση της ροής σε καρστικά υδροφόρα συστήματα, βρίσκονται σε στάδιο ανάπτυξης, απαιτούν μεγάλο όγκο εξειδικευμένης πληροφορίας, χαρακτηρίζονται δε από περιορισμένο βαθμό αξιοπιστίας και τεκμηρίωσης (Panagoroulos & Tuliapano, 2004). Ωστόσο, οι κώδικες αυτοί μπορούν να παράσχουν αξιόλογα αποτελέσματα με την προϋπόθεση της ύπαρξης σαφών και λεπτομερών δεδομένων εισόδου για την σχεδίαση και τροφοδότησή τους.

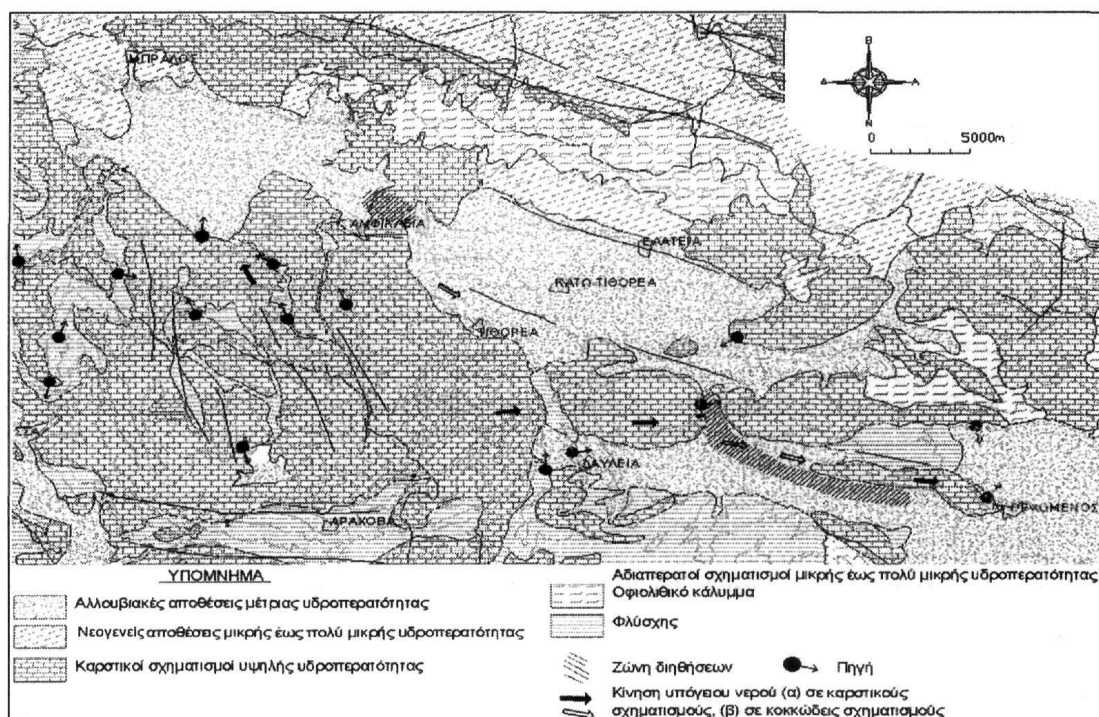
Η έλλειψη στη χώρα μας τέτοιων εξειδικευμένων δεδομένων αλλά συχνά και βασικών στοιχείων χαρακτηρισμού ενός υδροφόρου συστήματος καθιστά για έναν παραπάνω λόγο απαγορευτική τη χρήση αυτών των ομοιωμάτων. Έτσι, επιχειρήθηκε η προσομοίωση της υπόγειας ροής σε καρστικό υδροφόρο σύστημα με την εφαρμογή ενός καλά τεκμηριωμένου ομοιώματος υπόγειας ροής σε πορώδες μέσο, όπως το MODFLOW (Mc Donald & Harbaugh, 1988), η εφαρμογή του οποίου σε ανάλογα προβλήματα υπήρξε επιτυχής (Scanlon et al. 2003, O' Reilly 1998, Wilson & Akande 1995).

Η εφαρμογή έγινε στη λεκάνη του ποταμού Βοιωτικού Κηφισού. Πρόκειται για ένα καρστικό σύστημα σημαντικής έκτασης με αξιόλογη υδροφορία, που βρίσκεται σε υδραυλική επικοινωνία με τον ομώνυμο ποταμό, εμφανίζει εκδηλώσεις πηγών μεγάλης παροχής, στηρίζει σημαντικές παραγωγικές δραστηριό-

τητες, φιλοξενεί το πεδίο γεωτρήσεων κάλυψης των υδατικών αναγκών του λεκανοπεδίου Αττικής σε περίπτωση ανάγκης και δεν βρίσκεται σε κατάσταση υπερεκμετάλλευσης. Ιδιαίτερο επίσης γνώρισμά του είναι η ανάπτυξη σε μεγάλη έκταση ανάντη των πηγαίων εκφορτίσεων του κάτω ρου εκτεταμένου πεδίου γεωτρήσεων εκμετάλλευσης και δεδομένων πιεζομετρίας που υποδηλώνουν την ανάπτυξη ενιαίας υδροφορίας, χαρακτηριστικό της ομοιογενοποίησης της ροής στο χώρο αυτό, πέραν της επιλεκτικής κίνησης μέσω των καρστικών αγωγών.

2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ –ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Όπως προκύπτει από τη μελέτη του υδρολιθολογικού χάρτη που απεικονίζεται στο σχήμα 1, η περιοχή δομείται από τους ακόλουθους σχηματισμούς:



Σχήμα 1. Υδρολιθολογικός χάρτης της περιοχής ενδιαφέροντος, (από ΕΤΜΕ Πέττας-Αντωνίου et al., 2000).

(α) Αλλουβιακές αποθέσεις ποικίλου πάχους και τυπικής λιθολογικής σύστασης που χαρακτηρίζονται από μέτριες τιμές υδροπερατότητας. Εντός αυτών αναπτύσσεται υδροφορία μη αξιόλογου δυναμικού σε κλίμακα λεκάνης, ειδικά σε σύγκριση με αυτό της καρστικής υδροφορίας.

(β) Νεογενείς αποθέσεις σημαντικού κατά περιοχές πάχους, κατά βάση αργιλομαργαϊκής-αμμομαργαϊκής σύστασης, που εμφανίζουν επιφανειακή εξάπλωση κύρια στα βορειοδυτικά κράσπεδα της λεκάνης και επίσης στα βόρεια όριά της. Χαρακτηρίζονται από μικρές έως πολύ μικρές διαπερατότητες, δεν παρουσιάζουν υδρογεωλογικό ενδιαφέρον και λειτουργούν ως φυσικά υδραυλικά όρια του κύριου (καρστικού) υδροφόρου συστήματος.

(γ) Οφιολιθικό κάλυμμα με επιφανειακή ανάπτυξη κύρια στη βόρεια ζώνη της λεκάνης. Πρόκειται για πρακτικά αδιαπέρατο σχηματισμό (τουλάχιστον για τη θεώρηση και τις ανάγκες της παρούσας εργασίας) που λειτουργεί επίσης ως φυσικό υδραυλικό όριο της καρστικής υδροφορίας.

(δ) Φλύσχη με επιφανειακή εξάπλωση στα νότια και δυτικά της λεκάνης. Πρακτικά χαρακτηρίζεται ως αδιαπέρατος σχηματισμός και λειτουργεί, όπως και οι προηγούμενοι δύο σχηματισμοί, ως φυσικό υδραυλικό όριο στην κύρια καρστική υδροφορία της λεκάνης.

(ε) Καρστικό σύστημα που αποτελείται από σημαντικής εξάπλωσης ανθρακικά πετρώματα που στα κεντρικά τμήματα της λεκάνης καλύπτονται από τις αλλουβιακές αποθέσεις. Ο σημαντικός βαθμός καρστικοποίησής τους ενισχύεται από το ρηγματογόνο τεκτονισμό της περιοχής. Εξαιτίας της τεκτονικής

δράσης διακρίνονται 3 σαφείς υπο-περιοχές εντός της λεκάνης του Β. Κηφισού: ο άνω, ο μέσος και ο κάτω ρους. Οι περιοχές αυτές οριοθετούνται από τοπικές στενώσεις της ανάπτυξης του καρστικού συστήματος (περιοχές Αμφίκλειας και βορειοανατολικά της Δαύλειας). Στις ζώνες αυτές το πάχος των αλλουβιακών αποθέσεων που καλύπτουν τα ανθρακικά πετρώματα μειώνεται σημαντικά, ενώ παράλληλα περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό η σε έκταση και βάθος ανάπτυξη των ανθρακικών πετρωμάτων (ΕΤΜΕ Πέππας-Αντωνίου et al., 2000). Με βάση την ανάλυση γεωτρητικών δεδομένων (Παγούνης, 1994β), προκύπτει πάχος καρστικοποίησης που κυμαίνεται από 150-400m, ενώ δεν υφίστανται σαφή δεδομένα για τη μεταβολή του βαθμού καρστικοποίησης με το βάθος. Η τιμή αυτή δεν είναι ενιαία για όλη την έκταση της λεκάνης, αλλά μειώνεται προς τα βορειοδυτικά άκρα της (Μπράλος) και αυξάνει προοδευτικά προς τις νοτιοανατολικές της απολήξεις (Ορχομενός). Δεν υπάρχουν στοιχεία τεκμηρίωσης της ύπαρξης διακριτών σημαντικών καρστικών μορφών. Αντιθέτως, από την ανάλυση των διαθέσιμων υδρογραμμάτων καρστικών πηγών της περιοχής και γεωτρήσεων εντός της καρστικής υδροφορίας, προκύπτει εικόνα ομοιογενούς καρστικοποίησης και ενιαίας στάθμης υπόγειων νερών.

Χαρακτηριστικό γνώρισμα της λεκάνης Β. Κηφισού αποτελεί η εκδήλωση πολυάριθμων καρστικών πηγών σημαντικών παροχών, οι οποίες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε πηγές του άνω, μέσου και κάτω ρου και οι θέσεις των κυριότερων από τις οποίες απεικονίζονται στο χάρτη του σχήματος 1. Ο μέσος όρος του λόγου μέγιστης προς ελάχιστη παροχή των κύριων πηγών είναι 12.6. Σημαντικό ρόλο στη λειτουργία του συστήματος παίζει ο ομώνυμος ποταμός που διαρρέει τη λεκάνη και τροφοδοτεί με σημαντικές διηθήσεις την καρστική υδροφορία σε δύο τουλάχιστον ζώνες, στην περιοχή της Αμφίκλειας και δυτικά του Ορχομενού (Σχ. 1).

Η τροφοδοσία του καρστικού συστήματος επιτελείται με απευθείας κατεισδύσεις της βροχόπτωσης, από διήθηση κατά μήκος τμημάτων της κοίτης του Β. Κηφισού και επίσης μέσω υπόγειων πλευρικών μεταγίσεων από τη σημαντικής έκτασης λεκάνη τροφοδοσίας του συστήματος που εκτείνεται στα νότια και κύρια νοτιοδυτικά της πεδινής περιοχής στους καρστικούς ορεινούς όγκους που την περιβάλλουν. Εκτιμάται επίσης ότι ρόλο στην τροφοδοσία του καρστικού υδροφορέα παίζουν και οι αλλουβιακές αποθέσεις που επικαλύπτουν το καρστ, μέσω κατακόρυφων διασταλάξεων. Η κύρια εκφόρτιση του συστήματος επιτελείται μέσω των πολυάριθμων πηγών που εκδηλώνονται στα κράσπεδα της λεκάνης. Παράλληλα, μικροί όγκοι νερού εκφορτίζονται προς τα βορειοδυτικά μέσω υπόγειων πλευρικών μεταγίσεων στη συνέχεια του καρστικού συστήματος εκτός λεκάνης. Οι αντλήσεις μέσω γεωτρήσεων αποτελούν επίσης σημεία εκφόρτισης του υδροφόρου συστήματος και το μέγεθός τους αυξάνει προοδευτικά από τις αρχές του 1960. Σε γενικές γραμμές, η λεκάνη Β. Κηφισού θα πρέπει να συγκαταλέγεται μεταξύ των ελάχιστων περιοχών της χώρας οι οποίες δε βρίσκονται ακόμα υπό καθεστώς σημαντικής υπερεκμετάλλευσης.

Η προσομοίωση της καρστικής υδροφορίας περιορίζεται εντός της περιοχής όπου αναπτύσσονται συνθήκες κορεσμένης ροής, όπως αυτή οριοθετείται από την ανάπτυξη των αδιαπέρατων σχηματισμών που περιβάλλουν τη λεκάνη και από τη ζώνη ανάπτυξης των καρστικών πηγών που την χαρακτηρίζουν. Η έκταση της περιοχής αυτής φτάνει τα 950km², ενώ η ανάπτυξή της έχει διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, παράλληλη δηλαδή με την επικρατούσα διεύθυνση των κύριων συστημάτων ρηγμάτων.

3 ΔΕΔΟΜΕΝΑ-ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ

Για τη μαθηματική προσομοίωση της περιοχής μελέτης χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα δεδομένα πεδίου: ημερήσιες-μηνιαίες μετρήσεις βροχής και θερμοκρασίας για περίοδο 27 ετών –1967 έως 1994- (από ΥΠΕΧΩΔΕ, ΥΠΓΕ), λιθολογικές τομές 50 γεωτρήσεων και τα αποτελέσματα των αντίστοιχων δοκιμαστικών αντλήσεων (από ΙΓΜΕ), μηνιαίες μετρήσεις στάθμης σε 18 γεωτρήσεις που καλύπτουν συνολική περίοδο 7 ετών –1990 έως 1997- (από ΙΓΜΕ, ΕΥΔΑΠ), μηνιαίες μετρήσεις παροχών πηγών σε 11 θέσεις που καλύπτουν συνολική περίοδο 26 ετών –1969 έως 1995- (από ΙΓΜΕ, ΥΠΕΧΩΔΕ, ΥΠΓΕ) και μηνιαίες μετρήσεις επιφανειακής απορροής του ποταμού Β. Κηφισού που καλύπτουν συνολική περίοδο 10 ετών –1984 έως 1994- (από ΙΓΜΕ, ΥΠΕΧΩΔΕ). Δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα ιχνηθετίσεων για την περιοχή. Εκτός από τις χρονοσειρές των μετεωρολογικών παραμέτρων που παρουσιάζουν ελάχιστα κενά, καμία άλλη χρονοσειρά δεν παρουσιάζει χρονική συνέχεια, ενώ ελάχιστες καλύπτουν το πλήρες χρονικό διάστημα που προαναφέρθηκε για κάθε μια. Η βέλτιστη κοινή χρονική περίοδος αναφοράς στην οποία παρατηρείται σχετική πληρότητα στις υφιστάμενες χρονοσειρές των παραπάνω δεδομένων είναι διάρκειας 5 ετών (1984-1989).

Με βάση τα δεδομένα των μετρήσεων πεδίου και το εννοιολογικό μοντέλο που συντάχθηκε στα πλαίσια της μελέτης διαχείρισης των υδατικών πόρων των λεκανών απορροής του Β. Κηφισού και των λιμνών Υλίκης και Παραλίμνης (ΕΤΜΕ Πέππας-Αντωνίου et al., 2000), προκύπτει το συνοπτικό μέσο υδατικό ισοζύγιο της περιοχής μελέτης που παρουσιάζεται στον πίνακα 1. Στον ίδιο πίνακα παραθέτονται τα εύρη των κύριων υδραυλικών παραμέτρων που ορίστηκαν στην περιοχή που προσομοιώθηκε, όπως αυτά προέκυψαν από τη διαδικασία ρύθμισης του ομοιώματος που αναπτύσσεται στην επόμενη ενότητα της εργασίας.

Πίνακας 1: Συνοπτικό υδατικό ισοζύγιο και εύρος κύμανσης τιμών υδραυλικών παραμέτρων.

ΙΣΟΖΥΓΙΟ			
Τροφοδοσία	Όγκος ($\times 10^6$ m ³ /έτος)	Εκφόρτιση	Όγκος ($\times 10^6$ m ³ /έτος)
Κατείσδυση	200	Πηγές	240
Πλευρική υπόγεια	75	Πλευρική υπόγεια	8.8
		Αντλήσεις	26.2
Σύνολο	275	Σύνολο	275

ΕΥΡΟΣ ΚΥΜΑΝΣΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ		
T (m ² /d)	S _y	S
100-34000	0.001-0.12	1.0E-9-7.0E-3

* Τμήμα του όγκου αυτού διηθείται εκ νέου στο υδροφόρο σύστημα κατόπιν της θέσης εκφόρτισης της πηγής, μέσω διήθησης κατά μήκος της κοίτης του ποταμού Β. Κηφισού

4 ΣΧΕΔΙΑΣΗ-ΡΥΘΜΙΣΗ ΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

Εξαιτίας της περιορισμένης σημασίας της αλλουβιακής υδροφορίας, αλλά και της παντελούς έλλειψης δεδομένων για τη ρύθμιση ομοιώματος στην υδροφορία αυτή, η σχεδίαση του μοντέλου της λεκάνης του Β. Κηφισού περιορίστηκε στον καρστικό υδροφόρο. Το ομοίωμα που σχεδιάστηκε αποτελείται από ένα στρώμα (single layer), καταλαμβάνει συνολική έκταση $53 \times 18 \text{ km} = 954 \text{ km}^2$ και αποτελείται από 7252 κυψελίδες (cells) με διαστάσεις από 150-150m έως 800X800m (Σχ. 2).

Η τεχνική ανάπτυξης τηλεσκοπικής κανάβου αποσκοπεί κύρια στην επίτευξη υψηλότερης ακρίβειας προσομοίωσης στις περιοχές ιδιαίτερου ενδιαφέροντος (Wang & Anderson 1982, Παναγόπουλος 1996). Ως τέτοιες περιοχές επιλέχθηκαν οι ζώνες εκδήλωσης των καρστικών πηγών και οι κύριες ζώνες διήθησης του ποταμού προς την καρστική υδροφορία.

Για τον ορισμό της γεωμετρίας του καρστικού υδροφορέα χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα των λιθολογικών τομών γεωτρήσεων, ο υδρολιθολογικός και ο τοπογραφικός χάρτης της περιοχής (ΕΤΜΕ Πέππας-Αντωνίου et al., 2000), ο χάρτης ισοβαθών καμπυλών του αλλουβιακού καλύμματος και τα πορίσματα παλαιότερων ερευνητικών εργασιών που εκπονήθηκαν στη λεκάνη αυτή (Παγούνης, 1994α). Ο υδροφορέας χαρακτηρίστηκε ως ελεύθερος με δυνατότητα μετάβασης σε συνθήκες υπό πίεση, ανάλογα με τη σχετική θέση της πιεζομετρικής επιφάνειας σε κάθε ενεργή κυψελίδα προς την οροφή του υδροφορέα.

4.1 Επιλογή οριακών συνθηκών

Από την ανάλυση των πιεζομετρικών δεδομένων προκύπτει ότι η κύρια διεύθυνση υπόγειας ροής είναι από δυτικά προς ανατολικά. Ως βόρειο όριο ανάπτυξης του ομοιώματος έχει ληφθεί ο υφιστάμενος υδροκρίτης του άνω ρου και στη συνέχεια προς ανατολικά τα όρια των αλλουβιακών προσχώσεων και του καρστικού συστήματος με τους αδιαπέρατους σχηματισμούς (Σχ. 1). Ομοίως τα λοιπά εξωτερικά όρια του ομοιώματος ταυτίζονται με φυσικά υδρογεωλογικά όρια, όπως αυτά φαίνονται στο χάρτη του σχήματος 1, δηλαδή με τις επαφές μεταξύ διαπερατών και αδιαπερατών σχηματισμών. Στις περιοχές αυτές έχουν οριστεί οριακές συνθήκες σταθερής ροής και ειδικότερα συνθήκες μηδενικής ροής (συνθήκες Neuman). Εξαιρέση αποτελεί η νοτιοδυτική περιοχή του μοντέλου όπου τα φυσικά όρια εκτείνονται σε σημαντική απόσταση από την περιοχή του ομοιώματος. Με βάση τα υφιστάμενα δεδομένα η υπό προσομοίωση περιοχή δέχεται τροφοδοσία από τη ζώνη αυτή μέσω υπόγειων πλευρικών μεταγίσεων από τη συνέχεια του καρστικού συστήματος. Για την προσομοίωση του μηχανισμού αυτού, ορίστηκαν συνθήκες σταθερής ροής (ανά περίοδο φόρτισης) που περιγράφηκαν με τη χρήση του πακέτου Wells του MODFLOW. Ο προσδιορισμός των τιμών των συνθηκών αυτών έγινε με τη μέθοδο trial & error ώστε

να προσομοιώνεται ικανοποιητικά τόσο η πιεζομετρία όσο και οι εκφορτίσεις των πηγών με βάση τα υφιστάμενα υδρογράμματα γεωτρήσεων και πηγών. Με βάση τα υφιστάμενα δεδομένα, η επιλογή αυτού του τύπου οριακής συνθήκης εξασφαλίζει την ακριβέστερη προσομοίωση του μηχανισμού τροφοδοσίας με το μικρότερο δυνατό επηρεασμό του δικτύου υπόγειας ροής του ομοιώματος. Αντίστοιχη θεώρηση ακολουθήθηκε και για το βορειοδυτικό άκρο του ομοιώματος, όπου εκτιμήθηκε η συνιστώσα υπόγειας εκφόρτισης από το καρστικό σύστημα της λεκάνης του Β. Κηφισού. Το άνω και κάτω όριο του μοντέλου περιγράφεται επίσης από τη γενικότερη συνθήκη σταθερής ροής και για την ακρίβεια μηδενικής ροής σε επιφάνεια κάθετη προς το δάπεδο του υδροφορέα και προς την ελεύθερη πιεζομετρική του επιφάνεια.



Σχήμα 2. Κάρτα μαθηματικού ομοιώματος και οριακές συνθήκες. Με ελλείψεις σημειώνονται οι ζώνες ανάπτυξης των καρστικών πηγών.

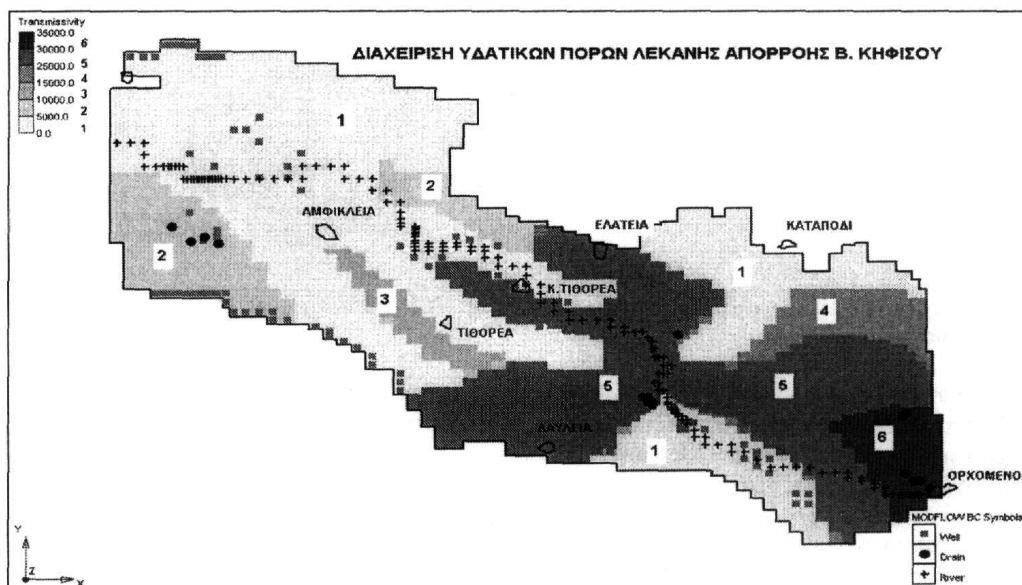
Η προσομοίωση των αντλήσεων από γεωτρήσεις έγινε επίσης με τη χρήση του πακέτου wells του MODFLOW, το οποίο όπως δηλώνει και η ονομασία του σχεδιάστηκε ειδικά για το σκοπό αυτό. Για τον υπολογισμό των αντλήσεων (κατά κύριο λόγο για άρδευση), χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από την ΕΥ-ΔΑΠ και τοπικούς φορείς της περιοχής. Παράλληλα, με βάση χάρτες χρήσης γης πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό, σύμφωνα με υφιστάμενο και κατάλληλο για την περιοχή υπολογιστικό μοντέλο (Panagoroulas, 1996).

Η λειτουργία των καρστικών πηγών προσομοιώθηκε με τη χρήση των συνθηκών ροής συναρτώμενης υδραυλικού φορτίου, ή συνθηκών Cauchy. Κατά τη συνθήκη αυτή, η ροή από/προς το χώρο του ομοιώματος είναι συνάρτηση της υφιστάμενης υδραυλικής κλίσης μεταξύ δύο σημείων και του συντελεστή conductance που εξαρτάται από την υδραυλική αγωγιμότητα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας που μεσολαβεί μεταξύ των σημείων αυτών (Wang & Anderson, 1982). Χρησιμοποιήθηκε το πακέτο drain του MODFLOW που επιτρέπει ροή μόνο εκτός του χώρου του ομοιώματος. Έτσι, μια πηγή εκφορτίζεται με ρυθμό που εξαρτάται από τη τιμή του συντελεστή conductance και την υδραυλική κλίση που προκύπτει μεταξύ του υπολογιζόμενου υδραυλικού φορτίου στην κυψελίδα του ομοιώματος που βρίσκεται η πηγή και του υψομέτρου εκδήλωσης της. Οι τιμές που επιλέχθηκαν κυμαίνονται από 10000 m^2/d (άνω ρους) έως 25000 m^2/d (κάτω ρους). Ο ίδιος τύπος οριακής συνθήκης επιλέχθηκε και για την προσομοίωση της υδραυλικής αλληλεπίδρασης ποταμού-υδροφορέα, με χρήση του πακέτου river. Ο ορισμός των παραμέτρων που απαιτούνται για τη συνθήκη αυτή, στηρίχθηκε στον υπολογισμό περιορισμένων χρονοσειρών διαφορικών παροχών σε επιλεγμένες θέσεις κατά μήκος της κοίτης του ποταμού και σε υπολογισμούς της παραμέτρου conductance, ώστε το τελικό αποτέλεσμα της προσομοίωσης να αποδίδει με ικανοποιητικό τρόπο τις σχέσεις υδραυλικής επικοινωνίας μεταξύ υδροφορέα και ποταμού. Οι τελικές τιμές conductance κυμαίνονται από 600-13000 m^2/d , είναι μεγάλες στις πιστοποιημένες ζώνες υδραυλικής επικοινωνίας ποταμού-υδροφορέα και μικρότερες στις υπόλοιπες περιοχές. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόζεται συχνά για την επίτευξη αξιόπιστης προσομοίωσης των κύριων μηχανισμών λειτουργί-

ας ενός υδροφορέα με ομοιώματα για τη σύνταξη των οποίων δεν διατίθενται λεπτομερή δεδομένα (Charalambous et al. 1995, Παναγόπουλος et al. 1999).

4.2 Κατανομή υδραυλικών παραμέτρων

Για τη σχεδίαση του μαθηματικού ομοιώματος απαιτείται ο ορισμός της κατανομής των ζωνών υδραυλικών παραμέτρων και ειδικότερα των τιμών μεταβιβαστικότητας T , υδροχωρητικότητας S και S_y καθώς επίσης και ο συντελεστής ανισοτροπίας τους (Rushton & Redshaw, 1979). Η επιλογή της μεταβιβαστικότητας T έναντι της υδραυλικής αγωγιμότητας K που άλλοι ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει σε ανάλογα προβλήματα (Scanlon et al., 2003), καλύπτει την έλλειψη λεπτομερών δεδομένων για το πάχος καρστικοποίησης. Η τελική κατανομή των ζωνών τιμών υδραυλικών παραμέτρων προέκυψε μέσω της μεθόδου trial & error, βασίστηκε δε στις υφιστάμενες τιμές από παλαιότερα αποτελέσματα δοκιμαστικών αντλήσεων (Παγούνης 1994α, Παγούνης 1994β) και σε βιβλιογραφικά δεδομένα (Fetter 1988, Freeze & Cherry 1979). Επισημαίνεται ότι επιβλήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις από τις τιμές αυτές ώστε μετά τη ρύθμιση του ομοιώματος και να αποδίδονται με ικανοποιητική ακρίβεια οι απορροές των καρστικών πηγών και τα υδρογράμματα στις θέσεις παρακολούθησης της πιεζομετρικής επιφάνειας. Το εύρος κύμανσης των τελικών τιμών είναι: $100\text{m}^2/\text{d} < T < 34000\text{m}^2/\text{d}$, $1.0\text{E}-9 < S < 7.0\text{E}-3$, $0.001 < S_y < 0.12$, με συντελεστή κατακόρυφης ανισοτροπίας 0.1. Σε γενικές γραμμές οι τιμές υδραυλικών παραμέτρων είναι μικρές στα άνω τμήματα του μοντέλου και προοδευτικά αυξάνονται προς τις κατάντη απολήξεις της λεκάνης, όπως χαρακτηριστικά απεικονίζεται στο σχήμα 3 της κατανομής των τιμών μεταβιβαστικότητας.



Σχήμα 3. Χωρική κατανομή ευρέων ζωνών μεταβιβαστικότητας T (m^2/d) στο χώρο του μοντέλου.

Εξαίρεση αποτελούν οι ζώνες μετάβασης από τον άνω στο μέσο και από το μέσο στον κάτω ρου, όπου ορίστηκαν μικρές τιμές T , S προκειμένου να προσομοιωθεί το περιορισμένο ενεργό πάχος καρστικοποίησης και η συνολικά περιορισμένη έκταση του υδροφορέα στις ζώνες αυτές. Σε αρκετές περιπτώσεις καθίσταται σαφές ότι η μεταβιβαστικότητα και οι συντελεστές υδροχωρητικότητας λαμβάνουν ακραίες τιμές (υψηλές ή και χαμηλές), που δε συνάδουν απαραίτητα με το χαρακτήρα της καρστικής υδροφορίας. Δεδομένου ότι το MODFLOW αφορά κορεσμένη ροή σε πορώδες μέσο, είναι απαραίτητη η διαφοροποίηση των τιμών υδραυλικών παραμέτρων ακόμα και εκτός πιθανών ορίων φυσικής σημασίας προκειμένου να αποδοθούν στοιχεία και μηχανισμοί υδροδυναμικής εξέλιξης που δεν απαντούν σε ένα τυπικό πορώδες μέσο (ταχύτατη εκφόρτιση-φόρτιση συστήματος κατά περιοχές).

Ο υπολογισμός της τροφοδοσίας του χώρου του ομοιώματος από απευθείας διήθηση της βροχόπτωσης και από υπόγειες πλευρικές μεταγίσεις έγινε με τη χρήση ομοιώματος βροχής απορροής (E-TME Πέττας-Αντωνίου et al., 2000). Για τη σύνθεση του ομοιώματος αυτού χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας χρονικής περιόδου 27 ετών σε μηνιαία χρονικά βήματα, από τους μετεωρολογικούς σταθμούς στην ευρύτερη περιοχή μελέτης. Για κάθε σχηματισμό ορίστηκε διαφορετικό

ποσοστό ενεργής κατέιςδυσης (βροχόπτωση-εξατμισοδιαπνοή), κυρίως με βάση τα λιθολογικά του χαρακτηριστικά: 90% για το καρστ, 10-20% για τις προσχώσεις και 5% για τους λοιπούς σχηματισμούς. Η ρύθμιση του ομοιώματος στηρίχθηκε στην ικανότητά του να αναπαράγει τις μετρημένες τιμές παροχών πηγών και την κύμανση των στάθμεων του υδροφόρου συστήματος, στις περιοχές όπου είναι σαφώς οριοθετημένη η λεκάνη απορροής.

4.3 Ρύθμιση-επαλήθευση ομοιώματος

Ως κριτήρια για τη ρύθμιση του μοντέλου αξιολογήθηκαν η μορφή της πιεζομετρίας σε ολόκληρη τη λεκάνη, η εξέλιξη της πιεζομετρίας σε επιλεγμένες θέσεις παρατήρησης, οι παροχές των πηγών και η ετήσια κύμανσή τους, η σχέση τροφοδοσίας μεταξύ ποταμού και καρστικής υδροφορίας καθώς επίσης και το συνολικό υδατικό ισοζύγιο της περιοχής. Δεν απαιτήθηκε συσχέτιση πιεζομετρίας-παροχών πηγών για την ανάπτυξη συνθετικών χρονοσειρών παροχών πηγών, αφού οι τελευταίες ήταν μεγαλύτερης διάρκειας από τις πρώτες. Το ομοίωμα ρυθμίστηκε σε συνθήκες δυναμικά εξισορροπημένου ισοζυγίου (dynamic steady state-DSS) και χρονικά μεταβαλλόμενου ισοζυγίου (transient state-TS), ενώ στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η επαλήθευσή του στηριζόμενοι στις υφιστάμενες μετρήσεις παροχών πηγών και στάθμεων καρστικής υδροφορίας. Η επίλυση του συστήματος εξισώσεων υπόγειας ροής έγινε με χρήση του πακέτου PCG2 και ως κριτήριο σύγκλισης χρησιμοποιήθηκε η διαφορά στάθμεων μεταξύ διαδοχικών λύσεων 0.01m.

Για τη ρύθμιση σε συνθήκες DSS επιλέχθηκε ο μέσος όρος των συνθηκών λειτουργίας του συστήματος την χρονική περίοδο 1984-1989, κατά την οποία επικρατούν μέσες συνθήκες εκμετάλλευσης, το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης είναι σταθερό και ο μέσος όρος των κλιματολογικών συνθηκών είναι αντιπροσωπευτικός των μέσων συνθηκών της περιοχής. Ο έλεγχος ρύθμισης έγινε με τις μέσες στάθμες της παραπάνω πενταετίας σε 18 γεωτρήσεις κατανεμημένες εντός της περιοχής ενδιαφέροντος και τις μέσες παροχές της ίδιας περιόδου των πηγών που εκφορτίζονται στη λεκάνη.

Χρησιμοποιώντας μηνιαίες περιόδους φόρτισης, πραγματοποιήθηκε για την ίδια πενταετία η ρύθμιση σε συνθήκες TS. Η περίοδος αυτή είναι η μόνη που παρέιχε αποδεκτό όγκο πρωτογενών δεδομένων για την επίτευξη ικανοποιητικού επιπέδου ρύθμισης. Ο έλεγχος ρύθμισης στηρίχθηκε στα υδρογράμματα όλων των πηγών εντός της λεκάνης και στα υδρογράμματα 10 γεωτρήσεων κατανεμημένων κατά μήκος του άξονα ανάπτυξής της.

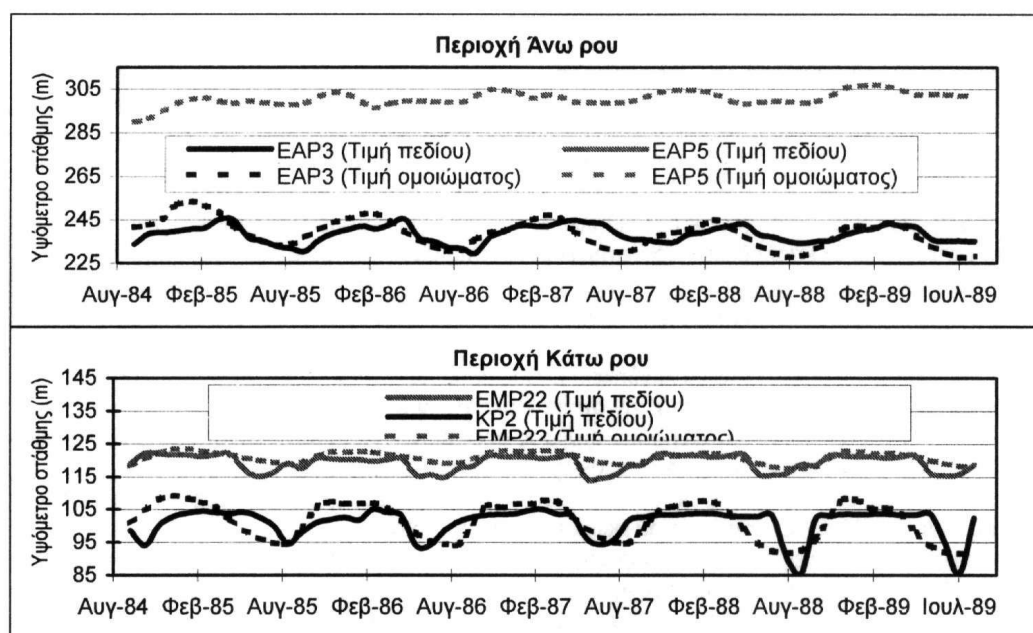
Η επαλήθευση του ομοιώματος έγινε για χρονική περίοδο 27 ετών (1967-1994). Για το διάστημα αυτό δεν υπάρχει κοινή περίοδος αναφοράς των απαραίτητων δεδομένων για ρύθμιση του ομοιώματος, πλην της περιόδου 1984-1989. Η ύπαρξη ωστόσο έστω και σποραδικών μετρήσεων, επέτρεψε την εκτέλεση του ομοιώματος για τη χρονική αυτή περίοδο, ώστε να εξασφαλιστεί ένα πρόσθετο μέτρο αξιολόγησης της ρύθμισής του. Η συμπεριφορά του ομοιώματος κατά την περίοδο αυτή δε διαφοροποιείται συγκριτικά με την περίοδο ρύθμισης, παρά την ύπαρξη εντός αυτής υγρότερων και ξηρότερων του μέσου όρου υδρολογικών ετών. Επομένως, ο βαθμός αξιοπιστίας του είναι ικανοποιητικός παρά τους περιορισμούς που αυτό έχει όπως περιγράφονται στη συνέχεια.

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε συνθήκες DSS η προσομοίωση κρίνεται ικανοποιητική αφού επιτεύχθηκε συντελεστής συσχέτισης μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων στάθμεων $R^2=0.98$ και απόκλιση μεταξύ υπολογισμένων και μετρημένων παροχών πηγών μικρότερη του 5%. Υψηλότερο επίπεδο ρύθμισης θα μπορούσε να επιτευχθεί με μεγαλύτερο αριθμό και καλύτερη κατανομή των σημείων ελέγχου.

Με βάση τα υφιστάμενα πρωτογενή στοιχεία περιορισμένου όγκου και αξιοπιστίας και δεδομένων των περιορισμών που προκύπτουν από την εφαρμογή του MODFLOW σε καρστικό σύστημα, εκτιμάται ότι η ποιότητα βαθμονόμησης είναι ικανοποιητική και σε συνθήκες TS που αποτελούν συνθήκες πραγματικής λειτουργίας του συστήματος. Για το σύνολο των 60 περιόδων φόρτισης της προσομοίωσης προέκυψαν: (1) για την κύμανση της στάθμης $RMSE=4.75m$ και απόκλιση σε πλήρη κλίμακα (219.56m) 2.16%, (2) για τις εκφορτίσεις των πηγών: $RMSE=1787.3m^3/h$ και απόκλιση σε πλήρη κλίμακα (15080 m^3/h) 11.8%. Από τις τιμές αυτές, προκύπτει ότι το επίπεδο ρύθμισης είναι εφάμιλλης ποιότητας με αυτό που επιτεύχθηκε σε καλύτερα μελετημένο καρστικό σύστημα προσομοιωμένο στο MODFLOW με χρήση μεγαλύτερου όγκου δεδομένων (Scanlon et al., 2003).

Το ομοίωμα έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί με ικανοποιητική ακρίβεια την τάση μεταβολής της πιεζομετρικής επιφάνειας χωρίς συστηματικές θετικές ή αρνητικές αποκλίσεις από αυτήν (Σχ. 4), εμφανίζοντας σχετική αδυναμία ακριβούς προσομοίωσης των ακραίων τιμών και των απότομων μεταβολών της, που είναι βέβαια ο κανόνας σε ένα καρστικό σύστημα. Ιδιαίτερα στην περιοχή του κάτω ρου παρατηρείται προοδευτική άνοδος της στάθμης και εν συνεχεία απότομη σταθεροποίησή της σε μια σταθερή τιμή με μικρές αποκλίσεις (Σχ. 4).



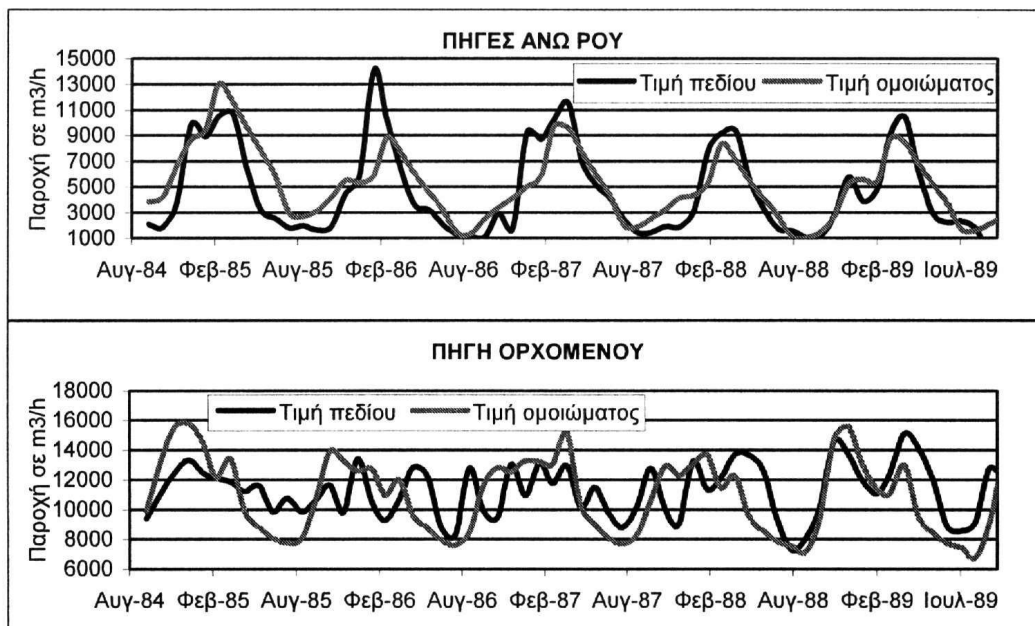
Σχήμα 4: Συγκριτικά υδρογράμματα θέσεων παρατήρησης πιεζομετρικής επιφάνειας στον άνω και κάτω ρου.

Οι αποκλίσεις μεταξύ μετρημένων και προσομοιωμένων τιμών, που δεν υπερβαίνουν τα 5m περίπου, αποδίδονται κυρίως στις ιδιαιτερότητες της υδροδυναμικής λειτουργίας των καρστικών συστημάτων και στις περιορισμένες δυνατότητες ακριβούς προσομοίωσης αυτών από έναν κώδικα ροής σε πορώδες μέσο. Οι ακραίες ελάχιστες τιμές των μετρήσεων πεδίου μπορούν συχνά να αποδοθούν σε επηρεασμό από άντληση.

Η λειτουργία των καρστικών πηγών προσομοιώνεται με απόλυτη ελευθερία, εξαιτίας των οριακών συνθηκών που επιλέχθηκαν, χωρίς συστηματικές ή πολύ σημαντικές αποκλίσεις από τις μετρημένες τιμές πεδίου (Σχ. 5). Τούτο ισχύει ειδικότερα στις ανάντη περιοχές του ομοιώματος, ενώ οι παρατηρούμενες αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες στις κατάντη ζώνες. Εκτός από τις ιδιαιτερότητες που χαρακτηρίζουν τους μηχανισμούς λειτουργίας μιας καρστικής πηγής και οι οποίες δεν μπορούν να περιγραφούν επακριβώς από έναν μη εξειδικευμένο κώδικα μαθηματικού ομοιώματος, ένα μέρος των παρατηρούμενων αποκλίσεων μπορεί να αποδοθεί σε σφάλματα μετρήσεων.

Κατά την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε με κύμανση των παραμέτρων που εξετάστηκαν σε εύρος $\pm 75\%$ των ορισμένων κατά τη ρύθμιση τιμών, προέκυψε ότι το ομοίωμα είναι ευαίσθητο στη μεταβιβατικότητα. Παράλληλα, εμφανίζει σημαντική ευαισθησία στη μεταβολή της τροφοδοσίας που δέχεται από βροχόπτωση αλλά και υπόγειες πλευρικές μεταγγίσεις. Δεν παρουσιάζεται σημαντική ευαισθησία στη μεταβολή των αντλούμενων όγκων νερού, ούτε στη μεταβολή των συντελεστών εναποθήκευσης. Ο ορισμός της τιμής conductance στην τιμή κατωφλίου που προσδίδει υψηλό βαθμό ελευθερίας στο ομοίωμα και επιτρέπει την ικανοποιητική εικόνα προσομοίωσης των μηχανισμών εκφόρτισης πηγών και υδραυλικής επικοινωνίας ποταμού-υδροφορέα, προσδίδει στο ομοίωμα μερική ευαισθησία στην παράμετρο αυτή.

Αποδεχόμενοι την ικανότητα του μοντέλου να προσομοιώσει τους κύριους μηχανισμούς λειτουργίας και εξέλιξης του καρστικού συστήματος της λεκάνης του Β. Κηφισού, όπως προκύπτει από τα παραπάνω αποτελέσματα, σχεδιάστηκαν και αξιολογήθηκαν εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης των υδατικών πόρων της περιοχής υπό μέσες, ακραίες υγρές και ακραίες ξηρές περιόδους.



Σχήμα 5: Συγκριτικά αντιπροσωπευτικά υδρογράμματα πηγών στον άνω και κάτω ρου (πηγές Ορχομενού).

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή του MODFLOW στο καρστικό σύστημα της λεκάνης του Β. Κηφισού, οδήγησε σε ικανοποιητικά και αξιόπιστα αποτελέσματα. Η ποιότητα ρύθμισης του ομοιώματος και η δυνατότητα ικανοποιητικής προσομοίωσης των κύριων μηχανισμών υδροδυναμικής λειτουργίας του συστήματος είναι περιορισμένη συγκριτικά με τα αποτελέσματα που έχουν επιτευχθεί σε προσχωματικούς υδροφορείς, ωστόσο κρίνεται αποδεκτή και ασφαλής για την εξέταση εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης των υδατικών πόρων της λεκάνης. Η ύπαρξη πρόσθετων πρωτογενών δεδομένων με καλύτερη χωρική κατανομή και μεγαλύτερο βάθος χρόνου, θα ενίσχυε σημαντικά την εικόνα του ομοιώματος. Η εφαρμογή απλής προσέγγισης για την προσομοίωση καρστικών υδροφορέων είναι εφικτή, υπό την προϋπόθεση σαφούς γνώσης της γεωμετρίας τους και της υδροδυναμικής τους λειτουργίας και εξέλιξης. Η κατανόηση των περιορισμών που ένα τέτοιο ομοίωμα έχει και επομένως η διατύπωση εφικτών στόχων, η υλοποίηση των οποίων δεν εμπίπτει στο πεδίο των περιορισμών του, είναι επιβεβλημένη. Η διατύπωση και γνώση των παραδοχών που εμπεριέχει η σχεδίασή του και που συνεπάγεται η μαθηματική προσέγγιση ενός πολύπλοκου συστήματος είναι απαραίτητη. Βασικές παραδοχές από το βαθμό ισχύος των οποίων εξαρτάται και η αξιόπιστη εφαρμογή του MODFLOW σε καρστικό υδροφόρο σύστημα είναι η ύπαρξη κορεσμένης ροής και η προσέγγισή της προς συνθήκες ροής πορώδους μέσου σε κλίμακα λεκάνης. Δια των παραδοχών αυτών προκύπτουν και οι βασικοί περιορισμοί στη χρήση του: για τη μελέτη και αξιολόγηση των απόλυτων τιμών των υδραυλικών παραμέτρων και της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος σε κλίμακα γεώτρησης, καθώς επίσης και για τη μελέτη της υδροδυναμικής εξέλιξης του συστήματος στις ζώνες τροφοδοσίας του όπου δεν επικρατούν συνθήκες κορεσμένης ροής.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ΕΤΜΕ Πέππας-Αντωνίου, Σταματοπούλου Α., Πετλέρος Β., Μπότσογλου Π., 2000. *Μελέτη Διαχείρισης Υδατικών Πόρων των Λεκανών απορροής του Βοιωτικού Κηφισού και των λιμνών Υλίκης και Παραλίμνης-τελική έκθεση*, Αθήνα, ΥΠΕΧΩΔΕ/Δ7.
- Παγούνης Μ., 1994α. *Συνοπτική έκθεση αποτελεσμάτων υδρογεωλογικής έρευνας στην περιοχή Βοιωτίας-Βοιωτικού Κηφισού για την ύδρευση της Πρωτεύουσας*, Αθήνα, ΙΓΜΕ.
- Παγούνης Μ., 1994β. *Υδρογεωλογική έρευνα Νομού Βοιωτίας*, Αθήνα, ΙΓΜΕ.
- Παναγόπουλος Α., 1996, *Μελέτη διαχείρισης των υπόγειων υδατικών πόρων της λεκάνης Τιρνάβου με τη χρήση μαθηματικού ομοιώματος*, Πρακτικά Β' Πανελλήνιο Συνέδριο "Εγγειοβελτιωτικά έργα-Διαχείριση υδατικών πόρων-Εκμηχάνιση Γεωργίας", 24-27 Απριλίου, 393-404.

- Παναγόπουλος Α., Γιαννάτος Γ., και Ζάννης Π., 1999. Χρήση μαθηματικών ομοιωμάτων στη διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων. Η περίπτωση της βιομηχανικής ζώνης της Πάτρας, Πελοπόννησος, *Πρακτικά 5^{ου} Πανελλήνιο Υδρογεωλογικό Συνέδριο*, 12-14 Νοεμβρίου, 151-168.
- Charalambous A., Buckle D., Sage R., and Aldous P., 1995. Contribution of river flow seepage to borehole yields, and its implication for source protection zone definition. In P. Younger (ed.), *Modelling river-aquifer interactions-BHS Occasional Paper No. 6*. 147-165, Newcastle, BHS, 165pp.
- Fetter C.W., 1988. *Applied hydrogeology*, Columbus, 529pp.
- Freeze R.A. and Cherry J.A., 1979. *Groundwater*, Englewood Cliff, 604pp.
- Mc Donald M., and Harbaugh A., 1988. *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*, Tech. *Water-Resources Inv.*, Bk. 6, Chap. A1, Washington, USGS, 750pp.
- O' Reilly A., 1998. *Hydrogeology and simulation of the effects of reclaimed-water application in west Orange and southeast Lake Counties, Florida-water resources investigations report 97-4199*, Tallahassee, USGS, 91pp.
- Panagopoulos A., 1996. *A methodology for groundwater resources management of a typical alluvial aquifer system in Greece*. Ph. D. Thesis (unpubl.), University Birmingham, 251p.
- Panagopoulos A. and Tulipano L., (eds.), 2004. *Groundwater management of coastal karstic aquifers*, COST Action 621 Final Report, Brussels, E.C.-DG XII, (in press).
- Rushton K. and Redshaw S., 1979. *Seepage and groundwater flow*, Norwich, 339pp.
- Scanlon B.R., Mace R.E., Barrett M.E. and Smith B., 2003. Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA. *J. Hydrology*, 276, 137-158.
- Wang H., and Anderson M., 1982. *Introduction to groundwater modeling*, New York, W.H. Freeman, 237pp.
- Wilson E., and Akande O., 1995. Simulation of streamflow behaviour in chalk catchments. In P. Younger (ed.), *Modelling river-aquifer interactions-BHS Occasional Paper No. 6*. 129-146, Newcastle, BHS, 165pp.

ABSTRACT

APPLICATION OF THE MATHEMATICAL MODEL MODFLOW ON A KARSTIC AQUIFER: THE CASE OF VIOTIKOS KIFISOS BASIN

Panagopoulos A.¹, Drakopoulou E.², and Perleros V.²

¹ National Agricultural Research Foundation, Institute for Management of Water Resources and the Environment, 57400, Sindos, Thessaloniki, panagopoulos.lri@nagref.gr

² Geologist, 4 Eschylou str, 19009, Drafi-Pikermi

³ Geologist, 56 Dionysou str., 152 34, Halandri, perleros@internet.gr

MODFLOW is a very well verified code of mathematical modeling for simulation of saturated groundwater flow in porous medium. Groundwater flow simulation in discontinuity media (i.e. media characterized by dominance of secondary and tertiary porosity as opposed to primary porosity), such as karstic aquifers, utilizing specialized models is problematic. Due to existing impedes the use of the conventional model MODFLOW was attempted for the simulation of the karstic system of the Viotikos Kifisos river aiming predominantly at assessing the potential, restrictions, particularities and conditions under which such a modelling code could be implemented, especially when relatively restricted volume of raw data is available. Compilation and calibration of the model suggest that MODFLOW may in general be implemented and can provide useful results. As in every mathematical model, knowledge of the assumptions made and the intrinsic restrictions involved is required, along with in-depth evaluation of its capabilities. The mathematical model of Viotikos Kifisos basin forms a valuable tool for management of its water resources and study of regional groundwater evolution.